

1/f ゆらぎは脳にとってなぜ心地よいのか

佐藤 和弘

1. はじめに.

人は一定不変であるとか完璧なリズム（周期性）にはなじめないらしい。むしろ小さな変動が含まれたり、リズム間隔にわずかなずれがあったりすると、それを心地よいと感じるらしい。この変動とかずれを「ゆらぎ」と呼んでいるが、たとえばゆりかごは母親（人）が揺するからそこにゆらぎが生じ、赤ん坊が心地よい眠りにつくのだろう。ぶらんこやロッキング・チェアも同様である。風、木漏れ日、河のせせらぎ、入江のざわめきなどは身近にありふれた現象であるが、ここにもゆらぎが満ちている。さらに注意すれば、板の木目（樹の年輪）、畳のいぐさ模様、瓦屋根、古い街並み、森林、重畳たる山並みにもゆらぎが含まれている。

ゆらぎ（不規則な変動）を周波数成分に分解し、その強度（スペクトル強度）を調べると、人が心地よいと感じるゆらぎにはある共通性があることが分かっている。すなわちそのスペクトル強度が低い周波数から高い周波数へと単調に減少する。スペクトル強度を周波数 f の関数として表すと、それが $1/f$ の形になるので、このゆらぎのことを $1/f$ （エフ分の一）ゆらぎと呼んでいる²⁾。

人は $1/f$ ゆらぎにさらされていると、無意識のうちに心地よくなり、安らぎを感じるのである。安らぎを感じるのは人の脳であるから、人の脳の中には $1/f$ ゆらぎに反応して、それを心地よいと感じる何らかのしくみが存在するはずである。この論文では、 $1/f$ ゆらぎと脳との関係、脳科学の知見にもとづいて議論しよう。

2. 脳は建て増し

脳は複雑なシステムである³⁾。しかし複雑とはいても、人工的なシステムとは際立った違いがある。人工的なシステムはある明確な目的があって計画される。目的を達成するためには高度な設計がなされる。無駄を排除し効率を究極まで追い求める。ところが脳は（そして実は生命そのものがそうなのだが）、初めから何か目的があって生まれたものではない。いわば「なりゆき」でできあがったものである。

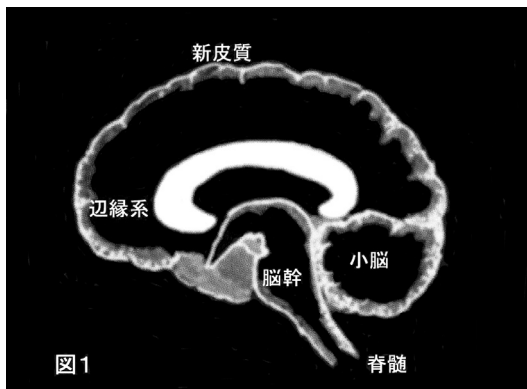
実際、生命は多くの無駄とあいまいさを内在したシステムである。しかし「なりゆき」でできあがったにしても、長い長い時間をかけ、変異と淘汰とにより繰り返し繰り返しテストされ、機能的にもかなり洗練された強靱なシステムになっている。しかも環境変化に対して柔軟に適応が可能である（人工的なシステムは効率こそ高いが脆弱である）。生命が今日まで連綿と継続してきたのにはそれなりのわけがある。

脳もなりゆきというか「建て増し」を重ねてでできあがったシステムである。建て増しを重ねるとともに新しい機能を獲得してきた。建て増し（進化）の歴史を反映して、脳は階層性を持ったいくつかのサブシステムからなっている。階層の下から順に並べると、脊髄、脳幹、小脳、大脳辺縁系、大脳新皮質となる。各階層はそれぞれ強い独自性を有している。脊髄は刺激に対する決まりきった（定型的）反射行動を制御している。脳幹は生命維持の中核である。小脳は運動を自動的に制御する。辺縁系は本能を支配する。新皮質は高次精神活動の座である。

こうした独自性を保ちつつも、下位脳と上位脳との間には強い連携が図られている。基本的には、下位脳が上位脳を興奮させ（賦活）、逆に

上位脳が下位脳に抑制をかけている（負のフィードバックループ）。脳はこうした階層の独自性と連携とのウエルバランスにより、統合のとれた一つのシステムとして機能している。

以下、この論文に深く関係する、脳幹、辺縁系、新皮質についてそのおおまかな構造を説明する（図1参照）。脳幹は（脊髄に近い順に）延髄、橋、中脳、間脳からなる。間脳はさらに視床と視床下部とに大別される。辺縁系は大腦皮質の一部であるが、辺縁系を形成する皮質は系統発生的に古い起源を持つ皮質であり、辺縁系の主要な領域を占める扁桃体と海馬はそれぞれ旧皮質と古皮質とに属している。大腦皮質は細胞構造学的に約50の領域に区別され（ブロードマンの脳地図）、その大部分を占めるのが新皮質である。新皮質は機能が高度に特化された領域（運動野、体性感覚野、視覚野など）と、特定の機能には対応せずむしろ統合的機能を果たす領域（連合野）とに分かれている。新皮質の拡大によって辺縁系は大腦の奥深く押し込まれ、脳幹を囲むように存在する。



同じ脊椎動物でも、魚類の脳はほとんど脳幹だけでできている。両生類では辺縁系が発達しているが新皮質はまだ痕跡程度である（新皮質が現われるのは爬虫類から）。哺乳類になると新皮質がかなり発達し、霊長類ヒトにいたっては新皮質が大腦全体を覆い尽くすほど増大している（あたかも停止のコントロールを失ったかのように）。また新しい脳ほど、新皮質が専門化と統合化という相反する方向に分かれて、二極化していく傾向がみられる。

3. 脳を構成するサブシステム

この節では各階層を構成するサブシステムの機能について議論する。

3.1 脳幹

脳幹には多数の核（ニューロンの集合体）が分布している。これら核は上位脳の特定の領域、あるいは上位脳全体を賦活させ、意識レベルを一定の水準に保つという重要なはたらきがある。

中脳にはA系列、B系列などと呼ばれる核が規則的に並んでいる。間脳の視床や視床下部には多数の核が分布し、神経の入出力経路を中継している。視床の核はもっぱら上位脳と直結する幹線路を中継し、視床下部の核は複雑に分岐する支線の中継している。視床下部の核は、自律神経系、循環器系、消化器系などのはたらきを自動的に制御する中枢でもある。そのため核は各種のモニター機能も備えており、体の内部環境（体温、血圧、心拍数、ホルモン濃度、グルコース濃度など）を常時監視し、必要に応じて担当する器官に調整のための指令を送っている。なお視床下部の直下にはホルモン系の中核である下垂体があり、視床下部は神経分泌によって下垂体を制御している。生物リズムの源である視交叉上核もまた視床下部に含まれる。

脳幹は生命維持のための自動制御システムである。脳幹による制御は無意識下で行われもちろん学習を必要としない。脳幹は遺伝子によってプログラムされその機能は固定されたものである。なお脳死とは脳幹の死であり、脳死状態の患者は生命維持装置の助けなしには生きられない。

3.2 辺縁系

辺縁系は本能を支配する脳である。摂食、摂水、生殖などの本能的欲求とそれを満たすための行動はとくに学習を必要としない。本脳は脳幹からの刺激により辺縁系が活性化されることによって発現する。しかし脳幹と違って辺縁系の応答は可変であり、本能的行動は状況に応じ

て変わりえる。

怒りや喜び（エモーション）、楽しみや悲しみ（フィーリング）、快感や不快感、といった「情」を感じるのも辺縁系である。恐怖や不安を感じ、危機に際しては攻撃か逃避かの決断を行い、行動の命令を発するのも辺縁系である。

本能といっても多くの種類があり、その一つ一つを担当する特定の領域が辺縁系の中に存在するかも知れない。しかしたとえそうだとしても、本能は相互に複雑に相関しあっており、辺縁系はこれら本能の「大議会」の場合（K.ローレンツ⁴⁾）になっている。

辺縁系の中では扁桃体と海馬と呼ばれる領域のはたらきがもっとも重要であることが分かってきた。とくに扁桃体（旧皮質領域とその直下のいくつかの神経核）には本能に関係する多くの機能が集中している。

扁桃体は中脳のA10と呼ばれる神経核（中脳被蓋野）からの賦活を受け、逆に扁桃体からA10核に対しては抑制がかかる。このフィードバックは快感や不快感の形成に関わっているとされる（いわゆる脳内報酬系⁵⁾）。恐怖や不安を感じるのも扁桃体のはたらきである（扁桃体を破壊された動物は恐怖を感じない）。攻撃か逃避かの判断を下し行動の命令を発するのも扁桃体である。これらは動物の本能的な適応行動の推進力になっている。

適応行動には記憶が不可欠である。たとえば毒性のあるものを食べて苦しんだとか、命に関わる危険な目にあった場合などは、その状況（いつ、どこで、どんなふうにというワンセット）を憶えておかねばならない。こうした記憶を保持しているのが古皮質の海馬という領域（辺縁系の中ではかなり広い）である。海馬は短期記憶の場として古くから知られていたが、海馬の役割にはたぶんもっと奥深いものがある。なお、脳が記憶を銘記するメカニズムはいまだに大きな謎である。シナプス部の可塑性が関与することは確かであるが、神経回路（ネットワーク）レベルでの理解には程遠い状況である。

扁桃体は海馬に蓄積された記憶を参照することにより、さまざまな判断を下している。海馬

はあたかも扁桃体をサポートするために発達したかのである（実際に海馬の方が系統発生的に新しい）。扁桃体と海馬とが連携して行うこれらの「状況判断」や、適応行動に対する「答え」はかなり正確なものである。辺縁系もまた変異と淘汰とによって繰り返し繰り返し徹底的にテストされてきたわけであり、正しい「答え」を出せない辺縁系では個体の生命維持が難しいだけではなく、種の保存も不可能（絶滅の道）だったはずである。その意味で辺縁系には、経験に裏付けられた豊かな「知恵」がある⁶⁾。従来、好き嫌いなどの感情は理性と比較して低レベルのものとされてきたが、それは知恵のある辺縁系が判断したことであり、その「答え」は決して侮れない。

記憶が適応行動にとって重要であることはいうまでもないが、その反面、恐怖記憶は扁桃体にはたらきかけて不安を感じさせる。危険が去れば恐怖や不安を感じ続ける必要はない。安全な状況下ではむしろ行動に悪い影響を及ぼす。このため海馬には無用の記憶を能動的に消去するメカニズムが備わっているらしい（前頭連合野の項も参照）。

脳幹の制御は無意識下に行われるが、脳幹は上位脳である辺縁系の影響を強く受けている。そのため、喜怒哀楽などの感情の起伏が、脳幹とくに視床下部が制御している循環器や消化器やホルモン系のはたらきにも影響を及ぼす。逆に内臓やホルモン系の調子が視床下部、そして辺縁系に影響を与える。さらに免疫系の活性もまた視床下部、したがって辺縁系とも相関していることが分かっている。

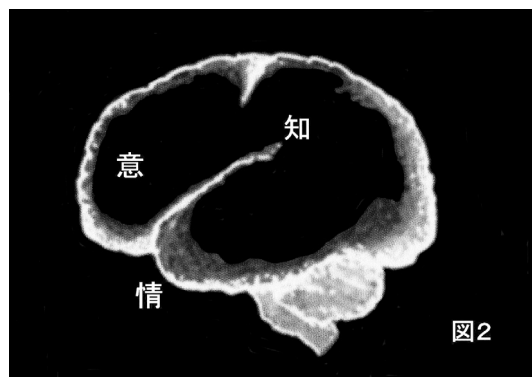
本能発現のために特別な学習が必要ないことから分かるように、辺縁系もまた遺伝子に強く依存している。しかし刺激に対する辺縁系の応答は、脳幹のように固定されてはならず、本能的行動は学習（海馬による記憶と扁桃体の判断）によって柔軟に変化する。これは環境に対する優れた適応能力であり、辺縁系はそれを可能とする（ある程度）可変なシステムなのである。脳幹よりもずっと高度な脳である。

3.3 新皮質

新皮質は、限定された機能に特化した運動野、感覚野、視覚野、聴覚野、言語野などの領域と、統合機能を担っている連合野とに分けられる（ヒトの場合むしろ連合野の方が広い）。

新皮質は生後目覚しく発達していく。新皮質もまた遺伝子に依存したシステムではあるが、辺縁系や脳幹とは異なりその依存度はとても弱い。実際、新皮質の大部分の神経回路（ニューロン間の結合）は生後になってはじめて完成されるものである。原始的なメタ神経回路のようなものは存在するのだろうが、生後受けた外部刺激に強く依存して、神経回路が大規模に構築されていく（ただし臨界期がある）。連合野にいたっては、あらかじめ決められたことなど何もないかのようなのである（生後の学習によってどうにでもなる）。新皮質は、遺伝子の支配を逃れた「超」可変システムということができる。

側頭連合野は長期記憶の座である。さらに分析、判断、推理などの高度な精神活動（思考）を行う領域でもある。一方前頭連合野は、さまざまな証拠から、意欲（やる気）や好奇心や創造性を生み出す領域であることが分かっている。側頭連合野がいわゆる「知」が宿る場所、前頭連合野がいわゆる「意」が宿る場所である。すでに述べたように辺縁系には「情」が宿っている。脳の中で「知・情・意」はこのように位置付けられている（図2参照）。もちろん知、意、情の領域は相互に強く連携している。それぞれの領域が連携を保ちつつバランスよく発達すること、これが脳というシステムを十分に機能させるためにはとても重要なことなのである。



前頭連合野は新皮質の中でも最後に発達する部分であり、生涯未完成のまま終わるともいわれている。前頭連合野は辺縁系の上位の脳である。前頭連合野は辺縁系からの賦活を受け、逆に辺縁系に対して制御をかけている。たとえば強い恐怖を感じて恐慌状態にあるとき、前頭連合野は扁桃体に抑制をかけて落ち着かせる。あるいは過度の緊張を解きほぐす。逆に命に関わる危険な状況にあるとき、扁桃体を刺激して戦う勇気を奮い立たせる。前頭連合野はまた海馬にはたらきかけて、無用なあるいは有害な記憶を消去し、海馬の機能を高いレベルに維持する（これは推測⁷⁾）。本能的行動に対しても前頭連合野はさまざまな影響を及ぼす。摂食、生殖行動などは前頭連合野の干渉を強く受けている。攻撃本能の副産物である友情や連帯のきずなりも、前頭連合野のはたらきが深く関わっている。

結局われわれが「理性」とよんでいるものの正体の一部は、前頭連合野による辺縁系への干渉である。辺縁系に対して前頭連合野はしばしば理性という名の「割りこみ」をかける。前にも述べたように、辺縁系には生きるための知恵があり、多くの場合正しい判断を下している（直観の正しさ）。前頭連合野の理性がその判断に待ったをかけたり変更を要求する。これがしばしば間違いを生む。辺縁系の判断にすべてを任せていたら間違いもずっと少ないことだろう。しかしこの間違いこそ、進化した脳が獲得した新しい能力なのである。紛れもなくそれは偉大な発見や創造力を生み出す原動力である。前頭連合野の辺縁系への干渉の強弱が、俗にいう、理性の勝った人、本能のおもむくままに行動する人を分けているのだろう。逆説的ではあるが、理性の勝った人ほど判断に不確実性（ゆらぎ）が増大する。

以上の議論をまとめると、脳は階層性を持った三つのサブシステムからなる。脳幹は生命維持のための自動制御システム、辺縁系は本能を制御し環境への適応をもたらす可変システム、新皮質は生後の学習によって獲得される超可変システムである。下位脳と上位脳、すなわち脳幹と辺縁系、辺縁系と新皮質（とくに前頭連合

野)との間には、賦活と抑制(ネガティブ・フィードバック)による制御がはたらいっている。

注意すべき点は、脳の進化とともに、上位脳による下位脳への干渉が徐々に強化されていることである。

4. 1/f ゆらぎはなぜ脳に心地よいか

前節までの議論を踏まえて、いよいよこの節では脳と1/f ゆらぎの関係を探っていく。

4.1 脳が1/f ゆらぎを「快」と感じるしくみ

繰り返しになるが、1/f ゆらぎを心地よいと感じるのは、他ならぬわれわれの脳である。脳には1/f ゆらぎを感知してそれを心地よいと感じるしくみがある。心地よいという感覚には、リラックス感とか、安心感とか、癒し感とか、いろいろな要素が含まれるのであろうが、それらはいずれも無意識下でなされる本能的な感覚と思われる。本能を制御しているのは辺縁系である。したがって脳が1/f ゆらぎを心地よいと感じるしくみには辺縁系が深く関わっているに違いない。さらに心地よいという感覚を「快」の感覚と解釈すれば、このしくみの正体について以下のような仮説を立てることができる。

〈仮説〉

脳が1/f ゆらぎを心地よいと感じるのは、脳幹A10神経核と辺縁系の扁桃体からなる「脳内報酬系」のはたらきによる。

その根拠となるのは、1/f ゆらぎのインプットから扁桃体による「快」反応までの一連のプロセスに関する以下の推測である。すなわち

- ・環境変動の情報はA10核に入力される。
- ・A10核は環境変動に1/f ゆらぎが含まれると強く活性化される。
- ・興奮したA10核からの刺激を受けて扁桃体に「快」感覚が誘起される。

脳幹には体温、血圧、グルコース濃度、ホルモン分泌量などの体内環境をモニターするセンサーが分布する。気温、気圧、湿度、照度などの外部環境も、末梢神経系から脳幹に送られ、脳幹のセンサーでモニターされる。最初のプロ

セスでは、各種センサーによってモニターされた環境変動の情報(出力の一部)が、脳幹のA10核に入力されると推測している。A10核は数万個のニューロンからなる複雑な神経ネットワークである。数理モデルを用いた研究⁸⁾によれば、神経ネットワークには固有の励起モードが存在する(モードは複数あるがドミナントなものは一つ)。この神経ネットワークに外部から変動が入力されると、一種の「強制振動」が起こってさまざまな応答(レスポンス)が生じる。二番目のプロセスでは、入力に1/f ゆらぎの成分が含まれるとA10核の固有モードが強く励起されて活性化が起きると推測している。そして最後のプロセスでは、興奮したA10核が扁桃体を刺激して、「快」反応が誘起されるとしている。

もちろんこれらの推測が正しいかどうかは今後の検証を待たねばならない。またここでは扁桃体に誘起される「快」反応が脳の心地よさに直結するとしているが、実際はそう単純ではない。扁桃体は海馬の記憶を参照するし、前頭連合野からの干渉も受ける。扁桃体の「快」が必ずしも脳の心地よさには直結しない複雑さがある。

4.2 1/f ゆらぎの生物学的意義

1/f ゆらぎが脳を心地よくさせるのはなぜだろう。単に脳をリラックスさせるという効果だけではなく、何かもっと重要な役割が隠されているのではないだろうか。

そこでA10核に1/f ゆらぎ以外のゆらぎ、たとえば白色ノイズ入力された場合を考えてみる。白色ノイズは、1/f ゆらぎがA10核の活性を高めたのとは対照的に、A10核の固有モードをかき乱して活性を低下させるか、あるいは1/f ゆらぎとは全く別種の活性を生じさせると仮定しよう。この仮定が正しいければ、A10核から扁桃体への刺激が弱まったり、全く異質の刺激が送られて、扁桃体には「不快」反応が生じることになる。

扁桃体は不安や恐怖を感じる脳でもある。扁桃体に起こった「不快」反応が本能的な不安や恐怖反応を引き起こす可能性は十分にある。不

安や恐怖は脳を緊張させ、体内あるいは外部環境に何らかの異常が起きている（迫っている）ことを警告する。これは生命にとって非常に重要なシグナルである。こうしてみると、 $1/f$ ゆらぎを心地よいと感じるしくみには生物学的に重大な意味があることが分かる。もしゆらぎが $1/f$ タイプから逸脱してくると、単に「心地悪く」なるだけでなく、それは生命にとって何かしら好ましくない状況なのである。

たとえば健康な心臓が生み出す心拍の間隔は $1/f$ でゆらいでいる⁹⁾。心拍がゆらぐということは心臓に活力があるということである。心臓に何か異常が生じると心拍が規則的になることが分かっている。心拍のゆらぎが $1/f$ である間は、A10核が継続的に活性化され、扁桃体は「快」を感じている。しかし心拍のゆらぎが $1/f$ から逸脱してくると、A10核の活性が変化し、扁桃体は「不快」を感じる。これは心臓に何らかの異常が発生していることを知らせる警告となる。

心拍だけでなく、体温、呼吸、腸の蠕動運動などの体内リズムについても同様である。体内リズムのそれぞれが $1/f$ ゆらぎを示せば、A10核の興奮は強まり、扁桃体は安定して快を感じる。それはまさに健康の証となって、脳（われわれ）に大きな安心感、リラックス感を与える。逆に $1/f$ ゆらぎからの逸脱が一致して大きくなると、扁桃体は不快感をつのらせて、健康の危機を呼び始めるのだろう。

外部環境のゆらぎについても同様のことがいえる。木漏れ日、ざわめき、風などの環境変動は、末梢神経から脳幹を経由してA10核に入力される。そこに $1/f$ ゆらぎが含まれる場合はA10核を興奮させ、扁桃体に「快」反応を誘起する。しかしゆらぎが $1/f$ から逸脱してくると、扁桃体は「不快」感を増して異常の発生を警告する。

$1/f$ ゆらぎは自然界に驚くべき普遍性をもって観察される現象である。巨視的スケール（宇宙、銀河、地球）から微視的スケール（原子、分子、素粒子）まで、自然界のいたるところに $1/f$ のゆらぎが潜んでいる。自然界のゆらぎが $1/f$ タイプを逸脱する（ $1/f$ ゆらぎが消失する）ということは、かなりの異常現象が大規模に進行している

ことを意味する。

脳にはそのような自然界の異常現象に対して、本能的に危機を感知し、警告を発するというしくみが組みこまれているのである。巨大地震の直前にネズミや犬などが異常な行動を見せるという報告が数多くなされている。地震は臨界性を示す自然現象の一つであり、断層面の破壊の規模分布に関してはべき則が成り立っている¹⁰⁾。破壊とともなって音波が発生するが、そのスペクトルは $1/f$ タイプに近い。ところが断層面の巨大な破壊が進行すると、ゆらぎがべき則から外れてくる。動物は非常にセンシティブなセンサー（たとえば聴覚）を持つので、ヒトの場合には検出不可能な微弱な環境変動にも反応することができる。こうして動物は、ヒトよりもずっと鋭く、環境変動の $1/f$ ゆらぎからの逸脱を感知して、危機の接近を知ることになる。これが動物を不安にさせ、異常な行動（いわゆる予知行動）を引き起こすのだろう。

5. おわりに

自然法則とは何の縁もない人間社会や組織体においても $1/f$ ゆらぎが観測されている。交通流のゆらぎ、インターネットのパケット流のゆらぎ、株価や為替レート変動のゆらぎなどはよく知られた例である¹¹⁾。規則で固めたような政治、法律、教育の世界にも実は適度なゆらぎが必要であり、それがわれわれによくなじむのは $1/f$ の場合ではないだろうか。過剰に規制をかけるとゆらぎが $1/f$ から逸脱し（白色ゆらぎに近づく）、そういう不自然な社会は長続きしない。

こうした人為的・人工的なゆらぎは（脳幹ではなく）前頭連合野にインプットされるのかも知れない。前頭連合野は辺縁系の上位脳であるから、ゆらぎが $1/f$ から逸脱してくると、何らかのしくみを通して、扁桃体に「不快」感が誘起されることもありうる。これが居心地の悪い社会、ストレス社会の正体なのかも知れない。

結局のところ、われわれが $1/f$ ゆらぎを心地よいと感じるのは、脳が進化の過程で獲得した適応のしくみ（能力）と思われる。単に安らぎを与えるだけではない。 $1/f$ ゆらぎからのずれ（消

失)を感知すると、警告を発して緊張させ、問題の発生あるいは危機の接近に対して何らかの備えを取らせる。これは生存確率を高めるために本能にインプットされたすばらしい「知恵」といえるのではないか。

著者は「脳自身」も1/f でゆらいでいるのが自然であると考えている。

(青森公立大学)

(2004年6月28日受付、2004年7月1日受理)

参考文献

1. 武者利光：『ゆらぎの発想』NHK出版（1994）
2. 武者利光編：『ゆらぎの科学 1～8 巻』森北出版（1991～1998）
3. 時実利彦：『脳の話』岩波書店（1962）
4. K.ローレンツ：『攻撃』みすず書房（1970）
5. 廣中直行：『人はなぜハマるのか』岩波書店（2001）
6. 腰原英利：『意識をつくる脳』東京大学出版会（1997）
7. 西村肇：『ゲノム医学入門』日本評論社（2003）
8. K.Satoh：J.Phys.Soc.Jpn.58(1989)2741-2757.
9. 佐藤和弘：青森公立大学紀要第8巻1号（2002）12-34.
10. 佐藤和弘：青森公立大学紀要第2巻1号（1996）16-27.
11. 高安秀樹・高安美佐子：『経済・情報・生命の臨界ゆらぎ』ダイヤモンド社（2000）

Abstract

The $1/f$ (f inverse) fluctuation is observed in nature quite generally. It is found that the $1/f$ fluctuation influences the human brain, and strongly settles the central nerve system. However the mechanism of this phenomenon is unknown as yet. This paper suggests that the interaction between the brain stem and the limbic system is responsible for this mechanism. The $1/f$ fluctuation is detected by the A10 nuclei (a pair of small neural network) in the brain stem, and the excited A10 stimulates the amygdaloid body in the limbic system. Then the amygdaloid body exhibits an emotional response (satisfaction) instinctively. When the $1/f$ fluctuation vanishes, the brain will recognize that a certain kind of dangerous situation progresses inside or outside of the body.